



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA
GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO CUAUTLA-YAUTEPEC (1702), ESTADO
DE MORELOS**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

| | |
|---|-----------|
| 1. GENERALIDADES..... | 2 |
| Antecedentes..... | 2 |
| 1.1. Localización..... | 2 |
| 1.2. Situación administrativa del acuífero..... | 5 |
| 2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD | 6 |
| 3. FISIOGRAFÍA..... | 7 |
| 3.1 Provincia fisiográfica..... | 7 |
| 3.2 Clima..... | 8 |
| 3.3 Hidrografía..... | 9 |
| 3.4 Geomorfología..... | 9 |
| 4. GEOLOGÍA..... | 10 |
| 4.1 Estratigrafía..... | 11 |
| 4.2 Geología estructural | 17 |
| 4.3 Geología del subsuelo..... | 19 |
| 5. HIDROGEOLOGÍA..... | 20 |
| 5.1 Tipo de acuífero..... | 20 |
| 5.2 Parámetros hidráulicos..... | 20 |
| 5.3 Piezometría..... | 20 |
| 5.4 Comportamiento hidráulico..... | 21 |
| 5.4.1 Profundidad al nivel estático..... | 21 |
| 5.4.2 Elevación del nivel estático..... | 22 |
| 5.4.3 Evolución del nivel estático | 23 |
| 5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea | 23 |
| 6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA..... | 24 |
| 7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS..... | 24 |
| 7.1 Entradas..... | 25 |
| 7.1.1 Recarga vertical (Rv)..... | 25 |
| 7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)..... | 26 |
| 7.1.3. Recarga inducida (Ri) | 27 |
| 7.2 Salidas | 27 |
| 7.2.1 Extracción por bombeo (B)..... | 28 |
| 7.2.2 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh) | 28 |
| 7.2.3 Descarga de manantiales (Dm) | 28 |
| 7.3 Cambio de almacenamiento (ΔVS) | 28 |
| 8. DISPONIBILIDAD | 29 |
| 8.1 Recarga total media anual (R)..... | 30 |
| 8.2 Descarga natural comprometida (DNC)..... | 30 |
| 8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)..... | 30 |
| 8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)..... | 31 |
| 9. BIBLIOGRAFÍA | 32 |

1. GENERALIDADES

Antecedentes

La Ley de Aguas Nacionales (LAN) y su Reglamento contemplan que la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) debe publicar en el Diario Oficial de la Federación (DOF), la disponibilidad de las aguas nacionales, en el caso de las aguas subterráneas esto debe ser por acuífero, de acuerdo con los estudios técnicos correspondientes y conforme a los lineamientos que considera la “NORMA Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, Conservación del recurso agua- Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales”. Esta norma ha sido preparada por un grupo de especialistas de la iniciativa privada, instituciones académicas, asociaciones de profesionales, gobiernos estatales y municipales y de la CONAGUA.

La NOM establece para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas la realización de un balance de las mismas donde se defina de manera precisa la recarga, de ésta deducir los volúmenes comprometidos con otros acuíferos, la demanda de los ecosistemas y el volumen de extracción de aguas subterráneas.

Los resultados técnicos que se publiquen deberán estar respaldados por un documento en el que se sintetice la información, se especifique claramente el balance de aguas subterráneas y la disponibilidad de agua subterránea susceptible de concesionar.

La publicación de la disponibilidad servirá de sustento legal para la autorización de nuevos aprovechamientos de agua subterránea, transparentar la administración del recurso, planes de desarrollo de nuevas fuentes de abastecimiento, resolver los casos de sobreexplotación de acuíferos y la resolución de conflictos entre usuarios.

1.1. Localización

El acuífero Cuautla-Yautepec, definido con la clave 1702 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción central del estado de Morelos, geográficamente se localiza entre los paralelos 18°30' y 19°00' de latitud norte y los meridianos 99°10' y 98°45' de longitud oeste, abarcando una superficie aproximada de 2,558 km², incluyendo los municipios del estado de México.

Limita al norte con los acuíferos Chalco-Amecameca, perteneciente al Estado de México y Zona Metropolitana de la Ciudad de México, perteneciente al Distrito Federal; al noreste con los acuíferos Valle de Puebla y Atlixco-Izúcar de Matamoros, pertenecientes al estado de Puebla; al este con el acuífero Tepalcingo-Axochiapan, perteneciente al estado de Morelos; al sur con los acuíferos Ixcaquixtla, perteneciente al estado de Puebla y Huitzucu, perteneciente al estado de Guerrero; al oeste con los acuíferos Zacatepec y Cuernavaca, pertenecientes al estado de Morelos (figura 1).

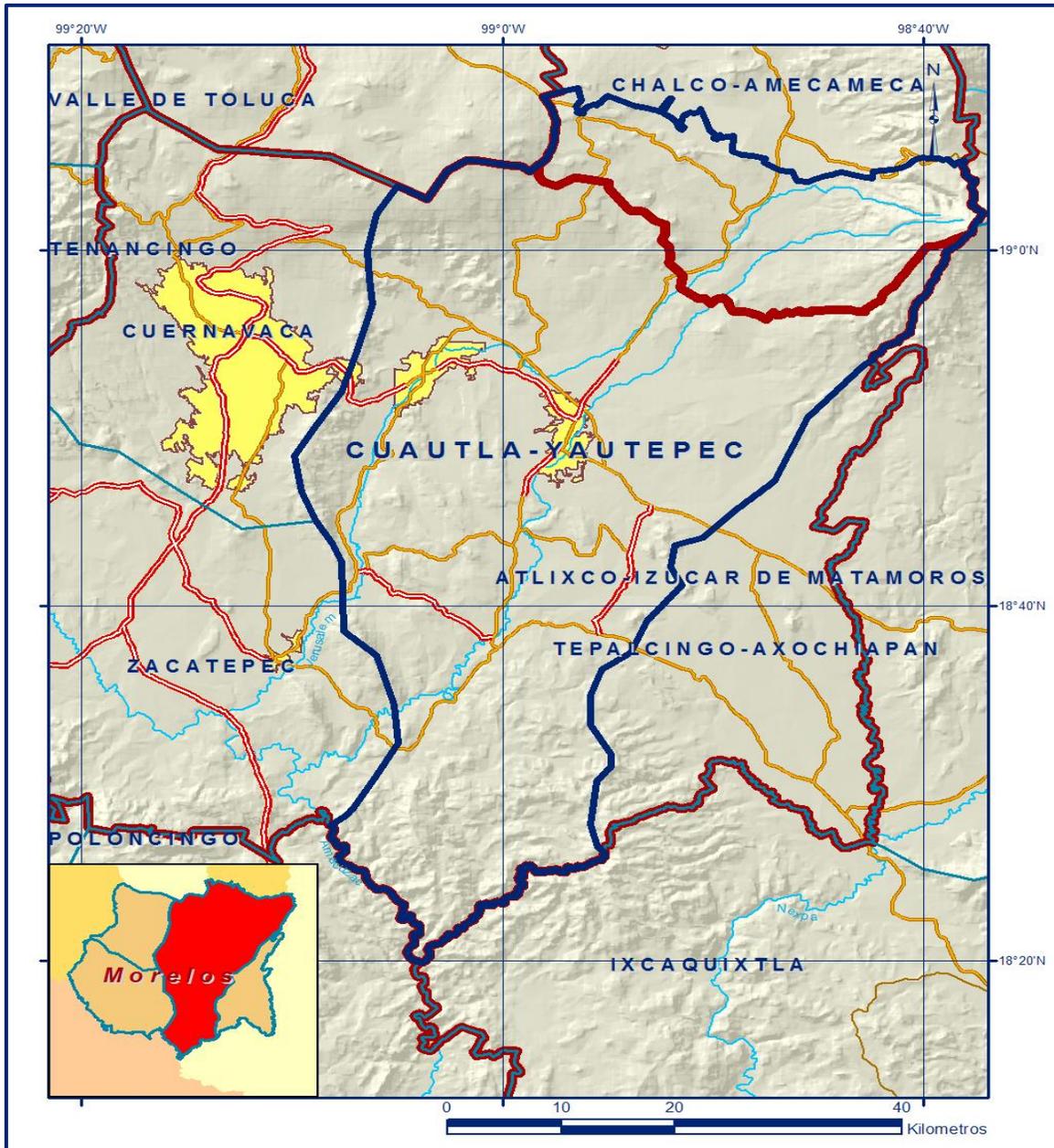


Figura 1. Localización del acuífero

La poligonal simplificada que delimita el acuífero se encuentra definida por los vértices cuyas coordenadas se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Coordenadas geográficas de la poligonal simplificada del acuífero

| ACUIFERO 1702 CUAUTLA-YAUTEPEC | | | | | | | OBSERVACIONES |
|--------------------------------|----------------|---------|----------|---------------|---------|----------|------------------------------------|
| VERTICE | LONGITUD OESTE | | | LATITUD NORTE | | | |
| | GRADOS | MINUTOS | SEGUNDOS | GRADOS | MINUTOS | SEGUNDOS | |
| 1 | 98 | 58 | 19.5 | 19 | 4 | 47.8 | DEL 1 AL 2 POR EL LIMITE ESTATAL |
| 2 | 98 | 37 | 57.7 | 19 | 0 | 53.5 | DEL 2 AL 3 POR EL LIMITE ESTATAL |
| 3 | 98 | 42 | 25.9 | 18 | 53 | 46.4 | |
| 4 | 98 | 42 | 46.5 | 18 | 53 | 35.0 | |
| 5 | 98 | 45 | 32.3 | 18 | 50 | 33.7 | |
| 6 | 98 | 47 | 5.5 | 18 | 47 | 1.3 | |
| 7 | 98 | 48 | 44.0 | 18 | 45 | 33.3 | |
| 8 | 98 | 50 | 27.6 | 18 | 43 | 49.6 | |
| 9 | 98 | 51 | 50.5 | 18 | 43 | 23.7 | |
| 10 | 98 | 52 | 0.8 | 18 | 42 | 11.2 | |
| 11 | 98 | 51 | 29.7 | 18 | 41 | 9.1 | |
| 12 | 98 | 53 | 8.2 | 18 | 39 | 9.9 | |
| 13 | 98 | 53 | 54.8 | 18 | 37 | 21.1 | |
| 14 | 98 | 55 | 17.7 | 18 | 36 | 24.1 | |
| 15 | 98 | 55 | 48.8 | 18 | 34 | 56.1 | |
| 16 | 98 | 55 | 48.8 | 18 | 33 | 17.6 | |
| 17 | 98 | 54 | 51.8 | 18 | 31 | 39.2 | |
| 18 | 98 | 54 | 51.8 | 18 | 30 | 57.8 | |
| 19 | 98 | 55 | 33.2 | 18 | 30 | 6.0 | |
| 20 | 98 | 55 | 48.8 | 18 | 27 | 40.9 | |
| 21 | 98 | 55 | 28.0 | 18 | 26 | 23.2 | |
| 22 | 98 | 55 | 10.0 | 18 | 26 | 5.4 | DEL 22 AL 23 POR EL LIMITE ESTATAL |
| 23 | 99 | 3 | 55.2 | 18 | 19 | 53.7 | DEL 23 AL 24 POR EL LIMITE ESTATAL |
| 24 | 99 | 8 | 9.7 | 18 | 27 | 38.0 | |
| 25 | 99 | 7 | 22.9 | 18 | 28 | 12.0 | |
| 26 | 99 | 7 | 2.2 | 18 | 28 | 37.9 | |
| 27 | 99 | 6 | 10.4 | 18 | 30 | 6.0 | |
| 28 | 99 | 4 | 57.9 | 18 | 32 | 15.5 | |
| 29 | 99 | 5 | 8.2 | 18 | 34 | 25.0 | |
| 30 | 99 | 6 | 0.0 | 18 | 37 | 10.8 | |
| 31 | 99 | 7 | 33.3 | 18 | 38 | 33.6 | |
| 32 | 99 | 7 | 38.5 | 18 | 42 | 26.8 | |
| 33 | 99 | 8 | 4.4 | 18 | 43 | 28.9 | |
| 34 | 99 | 8 | 51.0 | 18 | 44 | 46.6 | |
| 35 | 99 | 9 | 32.4 | 18 | 46 | 25.1 | |
| 36 | 99 | 9 | 53.2 | 18 | 48 | 24.2 | |
| 37 | 99 | 8 | 45.8 | 18 | 50 | 18.2 | |
| 38 | 99 | 7 | 38.5 | 18 | 52 | 1.8 | |
| 39 | 99 | 6 | 57.0 | 18 | 54 | 11.3 | |
| 40 | 99 | 6 | 10.4 | 18 | 56 | 57.1 | |
| 41 | 99 | 6 | 20.8 | 18 | 58 | 25.1 | |
| 42 | 99 | 6 | 25.9 | 18 | 59 | 58.4 | |
| 43 | 99 | 6 | 0.0 | 19 | 2 | 2.7 | |
| 44 | 99 | 5 | 0.1 | 19 | 3 | 37.7 | DEL 44 AL 1 POR EL LIMITE ESTATAL |
| 1 | 98 | 58 | 19.5 | 19 | 4 | 47.8 | |

Geopolíticamente el área que comprende el acuífero cubre totalmente los municipios Atlautla, Ozumba, Tepetlixpa y Ecatzingo, del Estado de México y los municipios Tlalnepantla, Ocuituco, Yecapixtla, Atlatlahucan, Totolapan, Tlayacapan, Yautepec, Cuautla y Ayala; de manera parcial comprende los municipios Juchitepec, del Estado de México y Tepoztlán, Tetela del Volcán, Zacualpan de Amilpas, Tlaltzapán, Tlaquiltenango y Tepalcingo; y pequeñas porciones de los municipios Jiutepec, Temoac, Jonacatepec y Emiliano Zapata.

1.2. Situación administrativa del acuífero

El acuífero Cuautla-Yautepec pertenece al Organismo de Cuenca Balsas. Su territorio se encuentra totalmente vedado y sujeto a las disposiciones de 5 decretos de veda, tres en territorio del Estado de Morelos y 2 en el Estado de México. El primero rige en la porción central y es el *“Decreto que establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de aguas del subsuelo en la zona comprendida dentro de los límites del Distrito de Riego número 16, del estado de Morelos”*, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 23 de junio de 1960.

El segundo decreto está vigente en una pequeña porción al noroeste del acuífero y es el *“Decreto que amplía la zona de veda para el alumbramiento de aguas del subsuelo establecida en la zona del estado de Morelos, según decreto de 1º de junio de 1960”*, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 26 de marzo de 1962. Ambas vedas son de tipo III, en la que la capacidad de los mantos acuíferos permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros.

En las porciones norte y sur del acuífero rige el *“Decreto que declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos en la zona no vedada del estado de Morelos, para el mejor control de las extracciones, uso y aprovechamiento de aguas del subsuelo de dicha región”*, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 6 de julio de 1973, esta veda es de tipo II, en la que la capacidad de los mantos acuíferos sólo permite extracciones para usos domésticos y de abrevadero.

En territorio del Estado de México que comprende este acuífero, rigen dos decretos de veda. Uno es el *“Decreto por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos en la superficie comprendida dentro de los límites geopolíticos del Estado de México, que no quedaron en las vedas impuestas mediante Decretos Presidenciales...”*, publicado en el DOF el 10 de julio de 1978.

Esta esta veda es de tipo II, en la que la capacidad de los mantos acuíferos sólo permite extracciones para usos domésticos y de abrevadero. En una pequeña área de extremo norte está incluida en el “Decreto que establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de aguas del subsuelo en la zona conocida por Cuenca o Valle de México”, publicada en el DOF el 19 de agosto de 1954.

Esta veda es de tipo I, en la que sólo se permite el alumbramiento de agua para uso doméstico y en la que no es posible aumentar las extracciones sin peligro de abatir peligrosamente o agotar los mantos acuíferos.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 2. El uso principal del agua es público-urbano. En su territorio se encuentra establecido el Distrito de Riego No. 16 “Estado de Morelos”. No se ha constituido hasta la fecha Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la superficie que comprende el acuífero se han realizado algunos estudios hidrogeológicos, algunos de cobertura regional, a continuación, se mencionan los más importantes:

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO PRELIMINAR DE LA ZONA DE CUAUTLA-YAUTEPEC MORELOS, realizado por ROASA en 1981 para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. El estudio tuvo como objetivos conocer las características, comportamiento y calidad del agua, determinar las condiciones de extracción, magnitud de la recarga y volumen susceptible de aprovecharse de los acuíferos de la zona.

Llevó a cabo actividades como censo e hidrometría de las extracciones, piezometría, ejecución de pruebas de bombeo, balance de aguas subterráneas y muestreo de agua para análisis fisicoquímico.

Concluye que el equilibrio hidrogeológico del acuífero está determinado por la descarga de los manantiales que representa el 65% de la recarga total y que un incremento del 25 % de la extracción no causaría un abatimiento generalizado en el acuífero.

ACTUALIZACIÓN GEOHIDROLÓGICA DE LOS ACUÍFEROS CUERNAVACA, CUAUTLA-YAUTEPEC, TEPALCINGO-AXOCHIAPAN Y ZACATEPEC, EN EL ESTADO DE MORELOS, elaborado por la Universidad Autónoma Chapingo, para la Comisión Nacional del Agua, en el 2010. El estudio tuvo como objetivo general el conocimiento de la condición geohidrológica de los acuíferos y recabar información para calcular su recarga y determinar la disponibilidad media anual de agua subterránea. Mediante la realización de actividades de campo que incluyeron censo de aprovechamientos, piezometría, hidrometría de las extracciones, realización de pruebas de bombeo, nivelación de brocales de pozos y reconocimientos geológicos, fue posible actualizar el balance de aguas subterráneas para calcular la recarga total media anual. Este estudio fue la base para la elaboración del presente documento, por lo que sus conclusiones y resultados se analizan en los apartados correspondientes.

3. FISIOGRAFÍA

3.1 Provincia fisiográfica

De acuerdo a la clasificación fisiográfica del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), el área que cubre el acuífero se ubica en dos provincias fisiográficas. La mayor parte se localiza en la provincia Eje Neovolcánico, Subprovincias Lagos y Volcanes de Anáhuac y Sierras del Sur de Puebla; una pequeña porción al oeste se localiza en la provincia Sierra Madre del Sur, Subprovincia Sierras y Valles Guerrerenses.

El Eje Neovolcánico se caracteriza por presentar una forma alargada que se extiende desde la región del Volcán Ceboruco, en el estado de Nayarit al poniente, hasta el Pico de Orizaba al oriente; está conformado por un gran número de estratovolcanes y conos cineríticos entre los cuales se han formado valles que han sido rellenados por depósitos volcánicos y lacustres.

Entre ellos destacan los volcanes de Colima, Tancítaro, Zinatlécatl (Nevado de Toluca), Popocatépetl, Iztaccíhuatl, Matlacuéyetl (La Malinche) y Citlaltépetl (Pico de Orizaba), que casi en línea recta atraviesan el país, más o menos a lo largo del paralelo 19°.

La subprovincia Lagos y Volcanes del Anáhuac, en la parte norte del acuífero, abarca todo el norte y el este del estado. Su área es de 2,169 km², que representan el 44.5 % de la superficie estatal. Un rasgo característico de la zona es la sierra de laderas escarpadas del Tepozteco, formado por la intensa erosión de flujos de lahares.

En el extremo noreste el límite estatal se extiende en una angosta franja por las faldas del Volcán Popocatepetl hasta su cráter.

Otra unidad de gran importancia es el gran llano con lomeríos de altitudes promedio de 1,250 msnm que se extiende desde Yautepec hasta Axochiapan, en cuya superficie se asienta la ciudad de Cuautla.

La subprovincia Sierras del Sur de Puebla, localizada al sureste del acuífero, penetra al estado en su porción centro-sur, ocupa el 12.2 % (594.6 km²) de la superficie total estatal y está representada por una sierra volcánica de laderas escarpadas y un cañón, completamente disectada, mostrando cerros tipo enjambre, cuya altitud va aumentando desde la periferia hasta alcanzar la máxima en el centro, que es de 1,650 msnm.

La Sierra Madre del Sur, localizada al sur de México, presenta una estructura compleja y se encuentra constituida por una serie de montañas que se extienden a lo largo de 1200 km desde el sur de Jalisco hasta el Istmo de Tehuantepec, al oriente de Oaxaca, cubriendo una superficie aproximada de 258,274 km².

Limita al norte con la Faja Volcánica Transmexicana (Eje Neovolcánico); al sur, con el Océano Pacífico y al oriente, con las provincias de Sierras y Valles del Sureste y la parte sur de la Planicie Costera del Golfo (Velázquez y Ordaz, 1992). Su parte más alta es muy angosta y forma el espinazo montañoso marginal hacia la costa. La subprovincia Sierras y Valles Guerrerenses, localizada al oeste, ocupa 2,110 km², 43.3 % del territorio morelense, e incluye los municipios del sur del estado.

3.2 Clima

De acuerdo a la clasificación de Köppen, modificada por Enriqueta García, para las condiciones de la República Mexicana, en el acuífero predominan los climas: cálido subhúmedo (Awo) con temperatura media anual mayor de 22 °C y temperatura del mes más frío mayor de 18 °C; templado, subhúmedo (C(w2)), con temperatura media anual entre 12 y 18 °C, temperatura del mes más frío entre -3 y 18 °C y temperatura del mes más cálido menor de 22 °C y semicálido subhúmedo del grupo C ((A)C(w2) y (A)C(w1)), con temperatura media anual mayor de 18 °C, temperatura del mes más frío menor de 18 °C y temperatura del mes más cálido mayor de 22 °C.

Para la determinación de las variables climatológicas se cuenta con información de las estaciones climatológicas que tienen influencia en el área del acuífero. Con estos datos y utilizando el método de los Polígonos de Thiessen, se determinaron valores de precipitación y temperatura media anual de **961.0 mm** y **21.0 °C** respectivamente.

De igual manera, con respecto a la evaporación potencial, se obtuvo un valor de **786.8 mm anuales**. El régimen pluvial presenta en términos generales dos períodos de ocurrencia, uno de julio a septiembre que correspondiente a la temporada de verano que es cuando se registran los valores más altos y otro de lluvias invernales que abarca de octubre a enero, con precipitaciones menos significativas, las cuales son provocadas principalmente por los frentes fríos que afectan la región.

3.3 Hidrografía

El acuífero se encuentra ubicado en la Región Hidrológica 18 “Río Balsas”, Subregión Hidrológica “Medio Balsas”, cuenca del Río Amacuzac. La región hidrológica comprende el 6% de la masa continental del territorio mexicano, entre los paralelos 17 00' y 20 00' de latitud norte y los meridianos 97°30' y 103°15' de longitud oeste, abarca porciones de varias regiones económicamente importantes del centro-occidente y centro-sur de México, a través de ocho estados de la república.

Sobre los ríos Cuautla, Ayala y Yautepec existen 21 pequeñas presas derivadoras con capacidad promedio de 110,000 m³ que en parte abastecen de agua a 14,000 ha de tres módulos de riego pertenecientes al Distrito de Riego No. 16. La red hidrográfica del área Cuautla-Yautepec define un acomodo muy particular, en la porción norte no existe un arreglo hidrográfico definido, es hasta la ladera de la Sierra Chichinautzin donde se define una red de tipo dendrítica. En la ladera del Volcán Popocatepetl se presenta una red de drenaje tipo radial, que cambia a dendrítica en la parte baja; ambas confluyen a los colectores de la zona, el río Yautepec y el río Cuautla, afluentes del río Amacuzac.

3.4 Geomorfología

Los rasgos morfológicos que muestra la zona del acuífero Cuautla-Yautepec, son reflejo de las características litológicas y tectónicas de las formaciones existentes: rocas sedimentarias marinas del Cretácico, sedimentos clásticos del Paleógeno y rocas volcánicas del Paleógeno-Neógeno, que en general definen barrancas de profundidad variable, lomeríos redondeados y cordones de cimas aplanadas.

A través del tiempo geológico el estado de Morelos ha sido afectado por períodos orogénicos y tectónicos, actividades que han dado lugar a la presencia de una gran variedad de geofomas. En el área se desarrollaron planicies en las que se acumularon productos vulcanoclásticos del Paleógeno-Neógeno y Cuaternario, al depositarse sobre una topografía muy accidentada, originaron valles construccionales.

4. GEOLOGÍA

La geología superficial del acuífero Cuautla-Yautepec está representada por unidades litológicas principalmente de origen sedimentario, volcánico y de manera aislada rocas intrusivas y metamórficas, producto de una sucesión de acontecimientos naturales que modelaron la corteza terrestre. De manera general está representada principalmente por rocas volcánicas y rocas sedimentarias de origen marino y continental. En forma aislada afloran rocas intrusivas y metamórficas en la porción oriental del acuífero (figura 2).

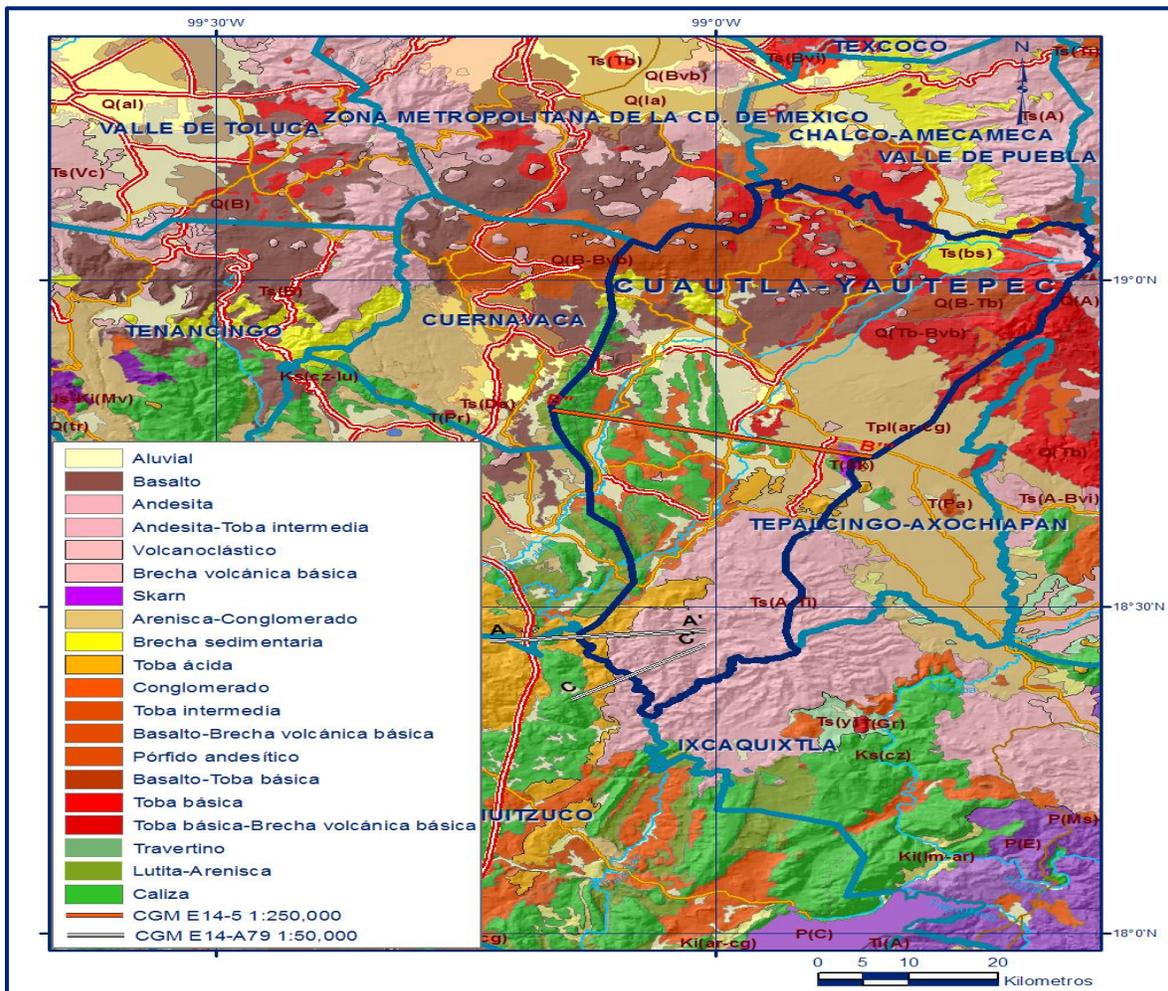


Figura 2. Geología general del acuífero

Desde el punto de vista tectónico, la región se ubica en el límite entre los Terrenos Guerrero y Mixteco (Campa M.F, 1981). El Terreno Guerrero se encuentra conformado por basaltos y andesitas en coladas y almohadillas. La edad de esta secuencia es cretácica, aunque podría ser jurásica superior; está cubierta transicionalmente por conglomerados, brechas volcánicas, grauvacas y pelitas tobáceas.

El acuífero Cuautla-Yautepec se encuentra localizado en el terreno Mixteco, que se caracteriza por contar con un basamento metamórfico Paleozoico, con una cubierta sedimentaria con sedimentos carbonatados y terrígenos depositados en un medio ambiente de plataforma y cuenca; por la cubierta volcánica que comparten es muy probable que a finales del Cretácico Superior o Terciario Paleógeno haya ocurrido la acreción de estos terrenos.

4.1 Estratigrafía

La columna estratigráfica de las unidades que afloran es la superficie cubierta por el acuífero comprende edades del Cretácico al Reciente. A continuación, se describen las diferentes de la más antigua a la más reciente:

CRETÁCICO

Formación Morelos

Fue propuesta por Carl Fries en 1960 para designar una gran secuencia de horizontes de calizas y dolomitas, de edad cretácica que afloran en gran parte del Estado de Morelos y zonas circunvecinas, sobre todo en los límites de los estados de México y Guerrero.

Según Fries, dentro de esta formación se pueden identificar plenamente dos miembros; el primero carbonatado, representado por estratos potentes de caliza y dolomitas y el segundo llamado Anhidrita por contener estratos de este material.

En términos generales esta formación consta esencialmente de una sucesión de horizontes calcáreos y dolomíticos con cantidades variables de pedernal en forma de nódulos y lentes, la parte más antigua está representada por el miembro Anhidrita.

El color cambia de una capa a otra, variando de gris claro a negro, estas últimas deben su color a la mayor abundancia de materia carbonosa; de manera general los estratos presentan un espesor que varía de 20 a 60 cm. Su espesor medido en varias secciones en el estado varía entre 450 y 900 m.

En la zona del acuífero consiste en una potente sección de calizas y dolomías que afloran en la porción sureste del área, en la sierra que divide las subcuencas de Cuernavaca y Yautepec. Constituye el anticlinal de San Francisco en donde se presentan calizas con inclusiones de dolomitas de color gris a gris oscuro, en capas de 10 a 15 cm. Su edad corresponde al Albiano-Cenomaniano.

Formación Cuautla

El nombre de la Formación Cuautla fue propuesto por Carl Fries (1960) para referirse a las calizas que afloran en las proximidades de Cuautla en el Estado de Morelos. Esta formación consta de tres facies predominantes: una sucesión gruesa de capas de caliza de estratificación medio a gruesa tipo de banco calcáreo; una sucesión más delgada de capas de caliza laminares de estratificación delgada y una sucesión muy delgada de capas de caliza clásica de estratificación delgada a mediana.

La facies que predomina en la zona es la caliza densa en estratos gruesos o bien en algunas ocasiones masiva compuesta por calcilimolita y calcarenita de tipo banco calcáreo en estratos gruesos, frecuentemente algunos de ellos presenten nódulos de pedernal.

Aflora al sur y poniente de Cuautla y en la zona noroccidental de Anenecuilco. En general, la secuencia es gradual y con cierta variación lateral, su base está constituida por conglomerados calcáreos, cuyos espesores varían desde 1 hasta 10 m. El espesor de esta formación es de 750 m, medidos en la Sierra San Gabriel y su edad asignada por Fries es del Cenomaniano-Turoniano.

Las rocas de esta formación y las de la Formación Morelos fueron intensamente deformadas por efectos orogénicos, produciendo fracturamiento que en muchas localidades fue sellado por calcita.

Formación Mexcala

También propuesta por Fries (1960) para designar una sucesión de estratos de areniscas, limolitas y lutitas que se encuentran sobreyaciendo en forma concordante a la Formación Cuautla.

La localidad tipo ubica en las proximidades del poblado Mezcala, en Guerrero. Está constituida principalmente, por lutitas y limolitas, con escasos horizontes de areniscas que hacia la base se hacen más calcáreas.

La intensa erosión sobre esta formación propició el depósito de rocas paleógeno-neógenas en forma discordante. Se encuentra expuesta en los lomeríos bajos que bordean a la Sierra San Gabriel y en las elevaciones menores, al oriente; en los cerros El Temilpa, Aguacate, El Rayado, Palo Amarillo, El Gallo y El Caracol. Cronológicamente se correlaciona con las formaciones Malpaso, Petlalcingo, Soyatal y Agua Nueva.

Debido al intenso plegamiento que exhibe, no se ha podido establecer una secuencia litológica detallada ni conocer su espesor real; sin embargo, se ha reportado un espesor hasta superior a 1000 m. Por su contenido fósil, Fries le asignó una edad correspondiente al Conaciano Campaniano. Sus afloramientos se extienden en el estado de Morelos y otros estados vecinos como Guerrero, México, Puebla y Oaxaca.

TERCIARIO

Grupo Balsas

Los primeros depósitos del Paleógeno-Neógeno que descansan sobre las rocas cretácicas consisten en un grupo de sedimentos clásticos, volcánicos y lacustres, no marinos, que se denomina Grupo Balsas. Se le ha designado como Grupo, ya que las unidades que lo conforman tienen litología muy variable, cada una de las cuales podría constituirse, por sí misma, como unidad con características propias, aunque en algunos lugares presenta facies que se interdigitan y en otras quedan superpuestas.

El nombre fue propuesto por Fries en 1960 para designar a una gran variedad de unidades litológicas que afloran en la cuenca del río Balsas, este grupo incluye una gran diversidad de materiales como son anhidritas, yesos, calizas lacustres, conglomerados calcáreos y volcánicos, areniscas, materiales tobáceos, derrames ígneos, brechas etc., su grado de compactación es igualmente variable por lo que no es factible determinarlo, dependiendo del material y tipo de depósito.

El grupo Balsas en la zona de estudio se encuentra descansando sobre las formaciones cretácicas, principalmente sobre la Formación Mexcala y en algunas ocasiones sobre la Formación Cuautla y la Formación Morelos en discordancia angular.

Aflora al occidente de Oaxtepec con una distribución variable, en muchas localidades del área rellenando generalmente zonas topográficamente bajas. Subyace a la Riolita Tilzapotla y a la Formación Tlaica, se correlaciona con el Grupo El Morro. La edad que se le asigna es del Eoceno Superior al Oligoceno Inferior, su espesor máximo medido es del orden de 500 m.

Riolita Tilzapotla

El nombre de Riolita Tilzapotla fue propuesta por Carl Fries para designar a los afloramientos de material tobáceo, derrames y brechas de composición riolítica que afloran hacia la porción sur del río Amacuzac. Es una de las primeras rocas volcánicas depositadas sobre el Grupo Balsas o, en su ausencia, sobre las rocas marinas cretácicas; en su mayor parte, se encuentra constituida por rocas ignimbríticas; sin embargo, dentro de ella se han registrado localmente derrames.

Estructuralmente, se acuña hacia al norte y aflora principalmente en la zona suroccidental. Su edad es del Oligoceno Tardío de acuerdo con determinaciones radiométricas y su espesor es sumamente variable, alcanzando en algunas localidades hasta 500 m.

Formación Tlaica

Con el nombre de Formación Tlaica se conoce a las rocas que forman la base de la secuencia volcánica del Paleógeno-Neógeno, constituida, principalmente, por ignimbritas y, en algunos casos, por brechas volcánicas que descansan sobre el Grupo Balsas. De forma masiva y compacta, afloran a medio kilómetro del poblado de Tlaica (de donde toma su nombre) y en el cerro El Colorado.

El espesor es muy variable, en los cerros El Colorado y Cacalotes, ubicados al sur y sureste del poblado de Tlaica, se ha logrado identificar su espesor máximo aproximado de 200 m; mientras que, al noroeste, norte y oriente de la zona, se acuña. Debido a que esta formación y la Riolita Tilzapotla presentan características litológicas muy semejantes, se le ha asignado una edad del Oligoceno Superior.

Rocas Metamórficas

Están presentadas por rocas de metamorfismo de contacto, skarn y en menor proporción mármol, que se originaron por cuerpos intrusivos posteriores al Grupo Balsas, conocidos como Diorita Xalostoc. Afloran al este del acuífero, en el límite con el acuífero Tepalcingo-Axochiapan, al este del poblado Xalostoc.

Formación Tepoztlán

Los únicos afloramientos de la Formación Tepoztlán se encuentran hacia la porción noroccidental de la zona, concretamente en los alrededores del poblado de Tepoztlán, ubicado al noroeste de Yautepec.

Cubre en discordancia erosional tanto al Grupo Balsas como a alguna unidad cretácica. Constituye el cerro El Sombrerito, localizado al sureste de Tlayacapan en las porciones norte y sur del poblado de Tepoztlán; a 6 km al este de dicha población, aparece cubierta, localmente, por los derrames basálticos del Grupo Chichinautzin. Está constituida por una secuencia de rocas clásticas volcánicas, estratificadas, de espesores que varían de 50 cm hasta más de 10 m, la secuencia vulcanoclástica presenta estructura masiva, poco deformada y constituye lahares.

La horizontalidad de su estratificación es atribuida a una clasificación de sedimentos depositados por corrientes de agua. Los componentes de las capas constan de fragmentos de roca andesítica porfídica, empacados en una matriz tobácea o arcillo-arenosa, su grado de redondez es irregular, variando la matriz a grano fino, de origen volcánico, que en su mayor parte es de composición andesítica; sus afloramientos se encuentran, esencialmente, al norte de Oacalco.

Su topografía presenta acantilados y bloques escalonados con sistemas de fracturamiento vertical. Su edad se determinó por medio de su posición estratigráfica y corresponde al Mioceno Inferior.

Grupo Ixtlilco

Este grupo está conformado por derrames volcánicos, con interestratificación de tobas híbridas; los derrames presentan diferentes colores y texturas en tanto que las tobas muestran un color que varía de gris a rojizo. Afloran hacia la porción sur y norte del poblado El Salitre, al noreste de Chinameca y al sur de Huitzililla, descansando sobre la Formación Tlaica; su cima está erosionada por lo que sólo pudo medirse un espesor incompleto de 500 m. Su edad corresponde al Mioceno-Plioceno.

Formación Cuernavaca

La litología de la Formación Cuernavaca es muy compleja y variada, comprende materiales diversos tales como cenizas, brechas y depósitos fluviales; travertino margas y paleosuelos que constituyen rellenos antiguos del valle de Yautepec e inclusive depósitos de yeso, así como materiales propios de abanicos aluviales.

En la región septentrional, y topográficamente más alta de esta unidad, está constituida predominantemente por conglomerados cuyos constituyentes principales son fragmentos de rocas andesíticas, mientras que hacia las zonas bajas las capas de conglomerados son de materiales más finos: arenas y limos.

En el valle Cuautla-Yautepec, se constituye de yesos, travertino cantos rodados, guijas y guijarros empacados en una matriz areno-arcillosa. Los fragmentos son de andesita porfídica de color gris claro; su estratificación es irregular y discontinua, aunque en algunas localidades es casi perfecta y prácticamente horizontal.

Al sur de Tlaltizapán se encuentran depósitos de yeso con diferentes grados de pureza; al sur de Temilpa se observan afloramientos de travertino, originado por los manantiales que existen en esa región. La Formación Cuernavaca descansa sobre la mayoría de las formaciones antes descritas en forma discordante, cubierta por las rocas de la Formación Chichinautzin. Se le asigna una edad Plioceno Medio-Plioceno Superior.

Formación Tlayecac

Nombre propuesto formalmente por Carl Fries (1966), tomando como localidad tipo a las rocas que afloran en el cerro El Mirador que se ubica al norte del poblado de Tlayecac. La unidad se encuentra aflorando en toda la porción meridional del Volcán Popocatepetl cuyos límites occidentales se localizan al oriente de Cuautla, Morelos; al sur aflora cerca de Jonacatepec y al oriente hacia la porción occidental del Estado de Puebla.

Algunos afloramientos, descansan sobre la Formación Cuautla, Grupo Tepexco y granodiorita Jantetelco. Esta formación se interdigita con la Formación Popocatepetl y con una parte del Grupo Chichinautzin. Está constituida principalmente por material muy mal clasificado, depositado por flujos de escombros y corrientes de lodos (lahares) del Volcán Popocatepetl; se pueden clasificar como brechas vulcanoclásticas.

El material no está cementado, no obstante, está muy compactado y suele expresarse geomorfológicamente como acantilados en los flancos de las barrancas. Por su posición estratigráfica, se le asigna una edad Plioceno Medio- Pleistoceno Medio.

CUATERNARIO

Grupo Chichinautzin

Carl Fries en 1965 propone este nombre para identificar a las corrientes lávicas, tobas, brechas y materiales clásticos interestratificados de composición andesítica y basáltica que descansan en discordancia angular sobre la Formación Cuernavaca, señalando su localidad tipo al cerro de Chichinautzin, ubicado en el límite entre el estado de Morelos y Distrito Federal.

Esta unidad estratigráfica comprende a todas las corrientes lávicas y depósitos asociados de composición andesítica y basáltica, incluyendo material detrítico depositado en agua. Sus afloramientos se ubican principalmente en el extremo noreste de la zona, donde está conformada por extensas y potentes corrientes de lava, que se encuentran interdigitadas con productos piroclásticos, brechas y aglomerados. Litológicamente este grupo se conforma principalmente por basaltos de olivino.

Las unidades litoestratigráficas que están cubiertas parcialmente por los basaltos son: las formaciones Cuernavaca y Tepoztlán, el Grupo Balsas y las lutitas y calizas del Cretácico; su espesor alcanza aproximadamente los 1500 m. Las rocas del Grupo Chichinutzin son correlacionables con las del Volcán Parícutín y su edad corresponde al Pleistoceno-Holoceno.

Depósitos clásticos

Gravas y arenas volcánicas

Constituidas principalmente por material volcánico que cubre las superficies topográficamente bajas, posiblemente producto de la erosión diferencial de la Formación Tlayecac. Su espesor es de algunos metros.

Aluvión

Consiste de clastos con textura arenosa, de granulometría media a gruesa y, en menor proporción, gravas que provienen de las rocas que afloran en la zona. Localmente, se encuentra intercalado con arcillas. Cubren casi toda la porción baja del área, de escaso espesor.

4.2 Geología estructural

Estructuralmente la zona muestra un complejo patrón geológico-estructural, debido a los procesos tectónicos ocurridos en la región y está representada por extensos y amplios pliegues y fallas.

Se pueden definir dos grandes unidades características, la primera identificada como unidad inferior, se encuentra constituida por la secuencia de sedimentos cretácicos marinos, cuya plasticidad favoreció durante la Orogenia Laramide la formación de grandes plegamientos que originaron amplias estructuras anticlinales y sinclinales características de la zona.

Las estructuras muestran dirección preferencial norte-sur, con mayor amplitud hacia el noroeste de la zona, que desaparecen por debajo del material volcánico del Cerro El Tepozteco. Las principales estructuras de esta unidad son los anticlinales Ticumán, San Carlos y Ayala, así como los sinclinales Yautepec, Oacalco y Cocoyoc-Xalostoc. Se les han asociado diversas fallas y fracturas orientadas W-E, con pocas variaciones.

El alto grado de plegamiento de la secuencia sedimentaria cretácica generó, en distancias relativamente cortas, cambios estructurales en su estratificación, presentando valores de echado desde 25 hasta 60°, correspondiendo los máximos valores al anticlinal Ayala.

La tectónica de los sedimentos cretácicos es muy compleja y en general predomina una serie de pliegues asimétricos, alargados, con los ejes orientados en dirección noroeste-sureste; sin embargo, dentro del patrón regional no coincide la Sierra Ticumán y las aledañas a la ciudad de Cuautla, donde las estructuras alargadas presentan orientación casi norte-sur. Se supone que esta desviación en los lineamientos de las estructuras, se debe a una cabalgadura aunada a las fallas Jojutla y Cañón de Lobos.

La segunda unidad identificada como superior, consta principalmente de rocas ígneas paleógeno-neógenas y cuaternarias, representadas por los productos volcánicos de la Formación Tepoztlán, la cual se encuentra cubierta por un enorme paquete de lavas y conos escoriáceos del Grupo Chichinautzin.

Estructuralmente, esta secuencia de rocas volcánicas fue, en su mayor parte, controlada por esfuerzos tensionales que ocasionaron alto grado de fracturamiento, con una dirección WSW a ENE, favoreciendo la formación de grandes cañadas, como se puede observar en la porción oriental de la zona.

Asimismo, hacia el extremo noreste del área se encuentran estructuras cónicas volcánicas dispuestas en dirección este-oeste sobre el Grupo Chichinautzin, formando los cerros El Mirador, Yoteco, Tlamalac y Xexquixtle, entre otros.

Mientras que las estructuras propias de la secuencia sedimentaria marina presentan un arreglo estructural definido norte-sur en la porción centro-sur y occidental de la zona, las estructuras características de fallas y fracturas del paquete superior se encuentran en forma perpendicular a la secuencia cretácica calcárea.

Esta relación estructural resulta de gran importancia geohidrológica, ya que dicha combinación de estructuras favorece el libre flujo subterráneo en estas unidades.

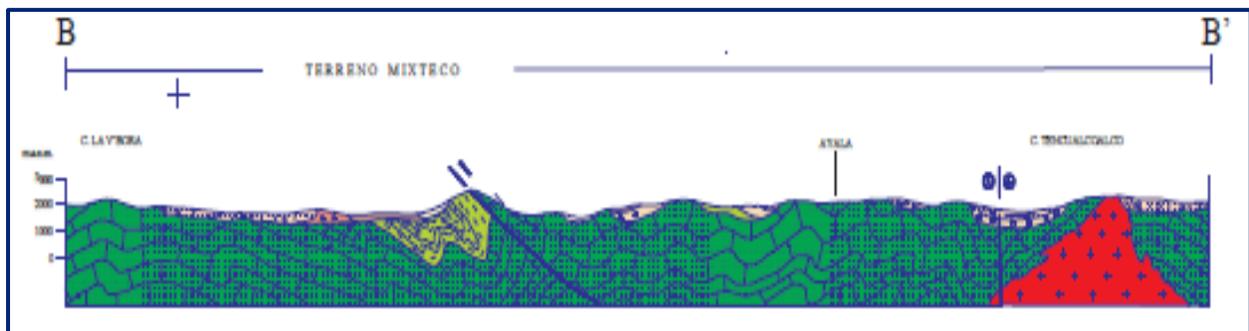
4.3 Geología del subsuelo

De acuerdo con la información geológica y geofísica recabada en el acuífero y por correlación con acuíferos vecinos, podemos definir que el acuífero se encuentra constituido, en su porción superior, por los sedimentos aluviales y fluviales de granulometría variada que constituyen el lecho y llanura de inundación de los ríos Cuautla y Yautepec y otros arroyos tributarios, así como por las areniscas y conglomerados con intercalaciones de basaltos, andesitas y areniscas, débilmente empacados en arenas y arcillas (Grupo Balsas y Formación Mexcala), que rellenan los valles, con espesores de hasta 200 m.

Esta es la unidad que se explota principalmente para satisfacer las necesidades de agua de la región.

La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas sedimentarias marinas, principalmente las calizas de las formaciones Morelos y Cuautla, que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento y/o disolución y que pueden presentar condiciones de confinamiento y semiconfinamiento debido a que están sobreyacidas por las lutitas y limolitas de la Formación Mexcala.

Las fronteras al flujo subterráneo y el basamento hidrogeológico del acuífero están representadas por las mismas rocas calcáreas al desaparecer el fracturamiento a profundidad y por las rocas arcillosas de la Formación Mexcala (figura 3).



Fuente: Carta Geológica-Minera E14-5 "Cuernavaca". Esc.1:250,000 (SGM, 1998)

Figura 3. Sección geológica esquemática

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

Las evidencias geológicas, geofísicas e hidrogeológicas permiten definir la presencia de un acuífero tipo libre, heterogéneo y anisótropo, constituido, en su porción superior, por los sedimentos aluviales y fluviales de granulometría variada que constituyen el lecho y llanura de inundación de los ríos y arroyos, así como las areniscas, conglomerados, basaltos y andesitas, que rellenan los valles con espesores de hasta 200 m.

La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas sedimentarias marinas, principalmente las calizas de las formaciones Morelos y Cuautla, que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento y/o disolución. Esta unidad puede presentar condiciones de **confinamiento y semiconfinamiento** debido a que están sobreyacidas por las lutitas y limolitas de la Formación Mexcala.

5.2 Parámetros hidráulicos

Como parte de las actividades del estudio realizado en 2010, se llevaron a cabo 3 pruebas de bombeo de corta duración, en etapa de abatimiento y recuperación. Adicionalmente, existe información de pruebas realizadas en estudios anteriores.

De los resultados de su interpretación por métodos analíticos convencionales se puede establecer que los valores de transmisividad varían de **13.8×10^{-3} a $83.2 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$** (1,192 m²/día a 7,189 m²/día). Los valores más bajos se presentan en la porción central del acuífero, específicamente en Tenextepango, mientras que el valor más alto se registró en la comunidad Ayala.

Con respecto a la conductividad hidráulica, los valores oscilan entre **$1.17 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ a $1.93 \times 10^{-4} \text{ m/s}$** (101 m/día a 16.7 m/día), típicos de permeabilidad de gravas y arenas finas a gruesas. Ninguna de las pruebas de bombeo contó con pozo de observación, por lo que no fue posible estimar el valor del coeficiente de almacenamiento.

5.3 Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, únicamente se cuenta con la información recabada de las actividades del estudio realizado en 2010.

5.4.2 Elevación del nivel estático

La configuración de elevación del nivel estático para el año 2010 presenta valores que varían de 950 a 1490 msnm, descendiendo gradualmente desde el extremo noreste hacia el suroeste, mostrando de esta manera, al igual que la profundidad, el efecto de la topografía y la dirección preferencial del flujo subterráneo noreste-suroeste.

Los valores más altos se registran en la zona en donde se ubican los poblados Los Limones, Yecapixtla y Huexca, y los más bajos en el cauce de los ríos Cautla y Yautepec, en las inmediaciones de los poblados Salitre, Ticumán y San Vicente de Juárez (figura 5).

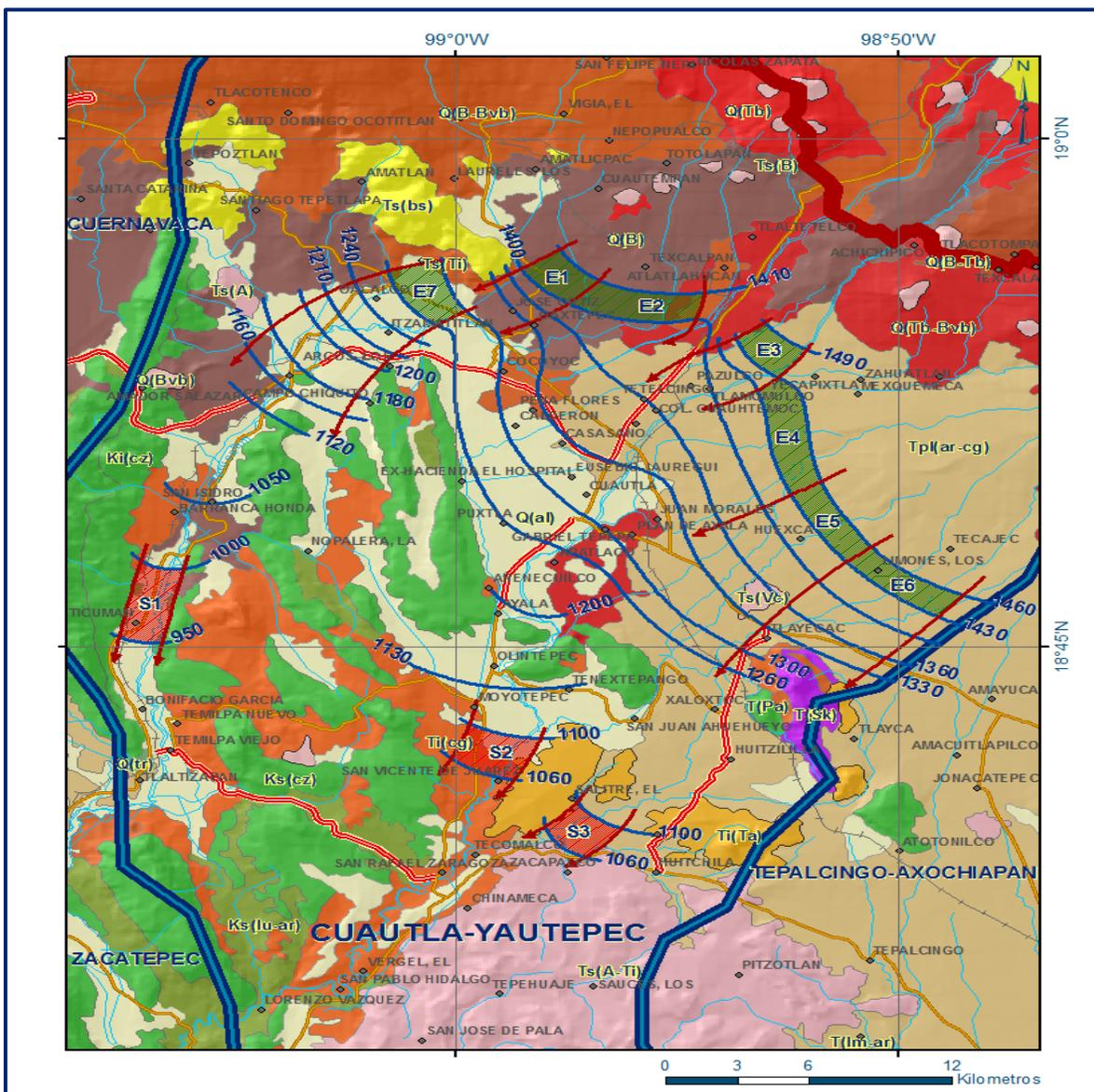


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2014)

5.4.3 Evolución del nivel estático

Con respecto a la evolución del nivel estático, no se logró una correlación puntual de los pozos en los que existe información piezométrica histórica que permita la configuración de evolución. Las escasas mediciones piezométricas recabadas en los recorridos de campo se encuentran dispersas en tiempo y espacio y no cubren en su totalidad la extensión superficial del acuífero.

Además, la configuración de la elevación del nivel estático no demuestra alteraciones del flujo natural del agua subterránea que indiquen la presencia de conos de abatimiento causados por la concentración de pozos. Por estas razones, se puede afirmar que las variaciones en el nivel del agua subterránea no han sufrido alteraciones importantes en el transcurso del tiempo, por lo que el cambio de almacenamiento tiende a ser nulo.

Las mediciones realizadas en 2010 serán el punto de partida para el establecimiento del monitoreo de los niveles del agua subterránea.

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los trabajos de campo del estudio realizado en 2010, se tomaron 25 muestras de agua de los pozos piloto distribuidos en la zona de explotación, para su análisis fisicoquímico correspondiente. Las determinaciones incluyeron: temperatura, potencial de hidrogeno (pH), iones principales, conductividad eléctrica ($\mu\text{s}/\text{cm}$), y sólidos totales disueltos (mg/l), para identificar los procesos geoquímicos o de contaminación y comprender el modelo de funcionamiento hidrodinámico del acuífero.

De manera general, las concentraciones no sobrepasan los límites máximos permisibles que establece la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021 "Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua", publicada en el Diario Oficial de la Federación el 2 de mayo del 2022. Con respecto a los sólidos totales disueltos (STD), los valores varían entre 80 y 690 ppm.

Las concentraciones más bajas se registran en la porción norte del acuífero, en las inmediaciones de las localidades Tepoztlán, Tlayacapan, Atlatlahuacán, Cuautla y Yecapixtla, con valores de 80 a 250 y las concentraciones más altas en la porción sur, de manera puntual en Yautepec, Ayala y Cuautla, con concentraciones de sólidos de 400 a 690 ppm.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con la información del censo de aprovechamientos, llevado a cabo como parte del estudio realizado en el año 2010, apoyado con la información del REPDA, se registraron un total de 956 obras en el acuífero que aprovechan el agua subterránea, de las cuales 509 son pozos, 424 norias, 1 galería filtrante y 22 manantiales.

Del total de obras, 873 se encuentran activas y 83 inactivas; de las obras activas 434 son para uso agrícola, 186 para uso público-urbano, 230 para actividades domésticas y 23 para uso industrial.

El volumen total de extracción es de **88.6 hm³/año**, de los cuales 36.8 hm³/año (41.5 %) se destinan al uso agrícola, 40.2 hm³/año (45.4 %) para uso público-urbano, 0.6 hm³/año (0.7%) para uso doméstico, 0.7 hm³/año (0.8%) para servicios, 6.2 hm³/año (7.0%) para uso industrial y 4.1 hm³/año (4.6 %) para otros usos.

Adicionalmente, a través de **manantiales** se descarga un volumen estimado de **250.7 hm³ anuales**, destinados principalmente al uso recreativo y en menor proporción al uso agrícola, sin conocer con precisión volumen de este último; por esta razón no se considera para estimar los retornos de riego.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de aguas subterráneas se planteó para 2010, en superficie de 380 km² del acuífero que corresponde a las zonas donde se cuenta con información piezométrica y en la que se localiza la mayor parte de los aprovechamientos. La diferencia entre la suma total de las entradas (recarga) y la suma total de las salidas (descarga), representa el volumen de agua perdido o ganado por el almacenamiento del acuífero en el periodo de tiempo establecido.

La ecuación general de balance, de acuerdo a la ley de la conservación de la masa es la siguiente:

$$\begin{array}{ccccccc} \text{Entradas} & & \text{Salidas} & & & & \\ \text{(E)} & - & \text{(S)} & = & & & \text{Cambio de masa} \end{array}$$

Aplicando esta ecuación al estudio del acuífero, las entradas quedan representadas por la recarga total, las salidas por la descarga total y el cambio de masa por el cambio de almacenamiento:

$$\text{Recarga total} - \text{Descarga total} = \text{Cambio de almacenamiento}$$

7.1 Entradas

De acuerdo con el modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico del acuífero, la recarga total que recibe (R) ocurre por tres procesos naturales principales: por infiltración de agua de lluvia en el valle, por infiltración a lo largo de los ríos principales, que en conjunto se consideran como recarga vertical (Rv) y por flujo subterráneo horizontal (Eh).

De manera inducida, la infiltración de los excedentes del riego agrícola, del agua residual de las descargas urbanas y de las fugas en la red de distribución de agua potable, constituye otra fuente de recarga al acuífero. Estos volúmenes se integran en la componente de recarga inducida (Ri).

7.1.1 Recarga vertical (Rv)

Es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo. Debido a que se tiene información para calcular el cambio de almacenamiento (ΔV), así como las entradas y salidas por flujo subterráneo, su valor será despejado de la ecuación de balance:

$$Rv + Eh + Ri - B - Sh - Dm = \pm \Delta V(S) \quad (1)$$

Donde:

Rv= Recarga vertical;

Eh= Entradas por flujo subterráneo horizontal;

Ri= Recarga inducida;

B= Bombeo;

Sh= Salidas por flujo subterráneo horizontal;

Dm = Descarga de manantiales;

$\Delta V(S)$ = Cambio de almacenamiento.

De esta manera, despejando la recarga vertical, se obtiene lo siguiente:

$$Rv = B + Sh + Dm \pm \Delta V(S) - Eh - Ri \quad (2)$$

7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

Una fracción del volumen de lluvia que se precipita en las partes topográficamente más altas del área de estudio se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través del pie de monte, para posteriormente recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan la zona de explotación.

La recarga al acuífero tiene su origen en la precipitación pluvial sobre el valle y en la infiltración de los escurrimientos superficiales:

Para su cálculo se utilizó la configuración de elevación del nivel estático para 2010 (figura 5). Con base en esta configuración se seleccionaron canales de flujo y se aplicó la ley de Darcy para calcular el caudal “Q” en cada uno de ellos, mediante la siguiente expresión:

$$Q = B * i * T$$

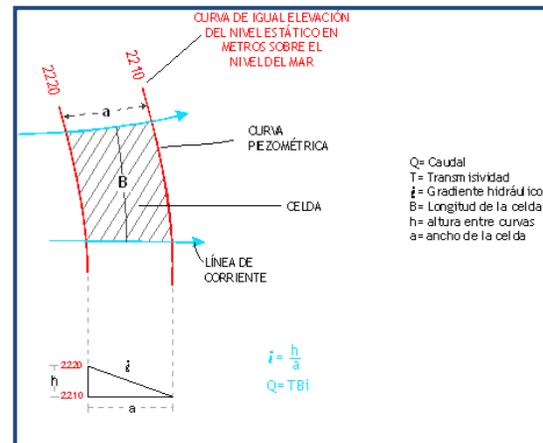
Donde:

Q = Caudal (m³/s)

B = Longitud de la celda (m)

i = Gradiente Hidráulico (adimensional)

T = Transmisividad (m²/s)



Los valores de transmisividad utilizados para el cálculo de las entradas y salidas subterráneas son los promedios obtenidos de la interpretación de pruebas de bombeo, adaptadas al espesor saturado en cada zona.

La recarga total del flujo subterráneo horizontal es la suma de los caudales de cada uno de los canales establecidos, en la tabla 2 se pueden observar los valores obtenidos en cada celda.

El volumen total de entradas por flujo subterráneo horizontal es de **93.8 hm³/año**.

Tabla 2. Cálculo de entrada por flujo subterráneo horizontal (2010)

| CANAL | LONGITUD L (m) | ANCHO B (m) | h_2-h_1 (m) | Gradiente i (m) | T (m ² /s) | CAUDAL Q (m ³ /s) | VOLUMEN (hm ³ /año) |
|-------|----------------------|----------------|------------------|--------------------|--------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|
| E1 | 2640 | 2160 | 10 | 0.0046 | 0.010 | 0.1222 | 3.9 |
| E2 | 5520 | 1440 | 10 | 0.0069 | 0.008 | 0.3067 | 9.7 |
| E3 | 3120 | 1440 | 30 | 0.0208 | 0.008 | 0.5200 | 16.4 |
| E4 | 5520 | 1680 | 30 | 0.0179 | 0.006 | 0.5914 | 18.7 |
| E5 | 4320 | 1440 | 30 | 0.0208 | 0.006 | 0.5400 | 17.0 |
| E6 | 4550 | 1200 | 30 | 0.0250 | 0.006 | 0.6825 | 21.5 |
| E7 | 3360 | 1920 | 40 | 0.0208 | 0.003 | 0.2100 | 6.6 |
| | | | | | | Total entradas | 93.8 |

7.1.3. Recarga inducida (Ri)

Aún en sistemas de riego muy eficientes, un cierto volumen del agua aplicada en el riego no es usado como uso consuntivo, se infiltra y eventualmente alcanza la superficie freática, dependiendo de propiedades del suelo, de las condiciones climáticas y de la profundidad al nivel estático.

Esta contribución al acuífero se le conoce como retorno de riego y según Jacob Bear (1970) su valor varía entre el 20 y 40 % del volumen usado en la irrigación. Debido a la falta de información confiable de láminas de riego por cultivo, se aplicó un balance hidrometeorológico para obtener un coeficiente de infiltración. Para este caso su valor es de 11.5% (OCB, 2012).

El volumen extracción de agua subterránea para uso agrícola es de 36.8 hm³ anuales, si consideramos que el 11.5 % del volumen aplicado al uso agrícola retorna como recarga efectiva al acuífero, obtenemos que su volumen de 4.2 hm³/año.

Por otra parte, al aplicar el 11.5% al volumen de agua para uso público-urbano de 40.2 hm³/año, arroja un valor de infiltración de 4.6 hm³/año.

Por lo tanto, el volumen total por recarga inducida asciende a 8.8 hm³/año. **Ri = 8.8 hm³/año.**

7.2 Salidas

Las descargas del acuífero ocurren principalmente por bombeo (B), salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh) y las descargas de manantiales (Dm).

7.2.1 Extracción por bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo asciende a **88.6 hm³/ anuales**.

7.2.2 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

Las salidas subterráneas fueron calculadas de la misma manera como se evaluaron las entradas subterráneas, a partir de la configuración de elevación del nivel estático, mostradas en la figura 5, tal como se muestra en la tabla 3.

El volumen total de salidas por flujo horizontal asciende a **9.3 hm³/año**.

Tabla 3. Cálculo de salidas por flujo subterráneo (2010)

| CANAL | LONGITUD L (m) | ANCHO B (m) | h_2-h_1 (m) | Gradiente i (m) | T (m ² /s) | CAUDAL Q (m ³ /s) | VOLUMEN (hm ³ /año) |
|-------|----------------------|----------------|------------------|--------------------|--------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|
| S1 | 1680 | 4080 | 50 | 0.0123 | 0.004 | 0.0824 | 2.6 |
| S2 | 2870 | 2640 | 40 | 0.0152 | 0.002 | 0.0870 | 2.7 |
| S3 | 2420 | 1920 | 50 | 0.0260 | 0.002 | 0.1260 | 4.0 |
| | | | | | | Total salidas | 9.3 |

7.2.3 Descarga de manantiales (Dm)

De la revisión de los títulos de concesión de agua procedente de la descarga de manantiales, algunos de ellos compartidos con el acuífero Cuernavaca y de los volúmenes medidos de entrega como agua superficial a las Asociaciones Civiles de Usuarios Agrícolas, se estima que su volumen es de **250.7 hm³/año**.

7.3 Cambio de almacenamiento (ΔVS)

Como se menciona en el apartado de evolución del nivel estático, no se dispone de información piezométrica para elaborar la configuración de la evolución del nivel estático para un periodo de tiempo.

Los registros existentes recabados en recorridos de campo se encuentran dispersos en tiempo y espacio y no cubren en su totalidad la extensión superficial del acuífero. Por otra parte, debido a que el volumen de extracción es menor a la recarga que recibe el acuífero, no se registran alteraciones en la dirección natural del flujo subterráneo ni conos de abatimiento. Bajo estas consideraciones, se considera que la posición del nivel del agua subterránea no ha sufrido alteraciones importantes y el cambio de almacenamiento tiende a ser nulo.

Por esta razón, para fines del balance de aguas subterráneas, no existe cambio de almacenamiento en el acuífero; es decir, $\Delta V(S) = 0$.

Solución de la ecuación de balance

Una vez calculadas las componentes de la ecuación de balance, procedemos a evaluar la recarga vertical por lluvia e infiltraciones, mediante la expresión 2, que fue establecida con anterioridad:

$$\begin{aligned} R_v &= B + Sh + D_m \pm \Delta V(S) - E_h - R_i \\ R_v &= 88.6 + 9.3 + 250.7 + 0.0 - 93.8 - 8.8 \\ R_v &= 246.0 \text{ hm}^3/\text{año} \end{aligned}$$

Por lo tanto, la recarga total es igual a la suma de todas las entradas:

$$\begin{aligned} R &= R_v + E_h + R_i \\ R &= 246.0 + 93.8 + 8.8 \\ R &= 348.6 \text{ hm}^3/\text{año} \end{aligned}$$

8. DISPONIBILIDAD

Para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas, se aplica el procedimiento de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, Conservación del recurso agua-que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales; en su fracción relativa a las aguas subterráneas, menciona que la disponibilidad se determina por medio de la expresión siguiente:

$$\begin{array}{ccccccc} \text{DISPONIBILIDAD MEDIA} & = & \text{RECARGA} & - & \text{DESCARGA} & - & \text{EXTRACCIÓN DE} \\ \text{ANUAL DE AGUA DEL} & & \text{TOTAL} & & \text{NATURAL} & & \text{AGUAS} \\ \text{SUBSUELO EN UN} & & \text{MEDIA} & & \text{COMPROMETIDA} & & \text{SUBTERRÁNEAS} \\ \text{ACUÍFERO} & & \text{ANUAL} & & & & \end{array}$$

Donde:

- DMA** = Disponibilidad media anual de agua del subsuelo en un acuífero
- R** = Recarga total media anual
- DNC** = Descarga natural comprometida
- VEAS** = Volumen de extracción de aguas subterráneas

8.1 Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero. Para este caso, su valor es de **348.6 hm³/año**, todos ellos son de recarga natural.

8.2 Descarga natural comprometida (DNC)

La descarga natural comprometida se determina sumando los volúmenes de agua concesionados de los manantiales y del caudal base de los ríos que está comprometido como agua superficial, alimentados por el acuífero, más las descargas que se deben conservar para no afectar a los acuíferos adyacentes; sostener el gasto ecológico y prevenir la migración de agua de mala calidad hacia el acuífero.

Para este caso particular, se considera como descarga natural comprometida es de **256.0 hm³ anuales**, que corresponden a la descarga de los manantiales y a la salida por flujo subterráneo, en la que está incluida la descarga por flujo base de los ríos Cuautla y Yautepec (celdas 1 y 2 de salidas subterráneas).

8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)

La extracción de aguas subterráneas se determina sumando los volúmenes anuales de agua asignados o concesionados por la Comisión mediante títulos inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA), los volúmenes de agua que se encuentren en proceso de registro y titulación y, en su caso, los volúmenes de agua correspondientes a reservas, reglamentos y programación hídrica, todos ellos referidos a una fecha de corte específica.

En el caso de los acuíferos en zonas de libre alumbramiento, la extracción de aguas subterráneas será equivalente a la suma de los volúmenes de agua estimados con base en los estudios técnicos, que sean efectivamente extraídos, aunque no hayan sido titulados ni registrados, y en su caso, los volúmenes de agua concesionados de la parte vedada del mismo acuífero.

Para este acuífero el volumen de extracción de aguas subterráneas es de **93,305,913 m³ anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre de 2022**.

8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)

La disponibilidad de aguas subterráneas, constituye el volumen medio anual de agua subterránea disponible en un acuífero, al que tendrán derecho de explotar, usar o aprovechar los usuarios, adicional a la extracción ya concesionada y a la descarga natural comprometida, sin poner en peligro a los ecosistemas.

Conforme a la metodología indicada en la norma referida anteriormente, se obtiene de restar al volumen de recarga total media anual, el valor de la descarga natural comprometida y el volumen de extracción de aguas subterráneas.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= \text{R} - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 348.6 - 256.0 - 93.305913 \\ \text{DMA} &= -0.705913 \text{ hm}^3/\text{año.} \end{aligned}$$

El resultado indica que no existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones; por el contrario el déficit es de **705,913 m³ anuales**.

9. BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua, 2010. Actualización Geohidrológica del acuífero Cuernavaca, Cuautla-Yautepec, Tepalcingo-Axochiapan y Zacatepec, en el estado de Morelos. Realizado por la Universidad Autónoma Chapingo.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, 1981. Estudio Geohidrológico Preliminar de la Zona de Cuautla-Yautepec, Morelos. Realizado por Rocha y Asociados, S.A. (ROASA)